乌海市沿黄河两岸沙丘风沙流结构差异与冰面风沙特征①

胡 平， 杨建英， 张 艳， 吴红璇， 刘 韵， 史常青
(北京林业大学水土保持学院,北京 100083)

摘 要: 为了研究乌海市沿黄河两岸沙丘风沙流结构差异与冰面风沙特征,开展以黄河西岸－黄河冰面－黄河东岸为路径的风沙观测实验,通过对比分析黄河两岸沙丘风沙流结构、沙尘粒度特征,为黄河沙尘防控问题提供理论依据。研究表明:两岸沙丘总输沙率均随着高度增加而减小,东岸输沙率垂直拟合优度较西岸差,风沙流比西岸更容易达到非饱和状态。黄河冰面裂缝滞留沙尘粒径大于0.19 mm,较小颗粒则输移到东岸,东岸沙丘受矿采区粉尘影响,极细砂粒(0.05～0.1 mm)含量增加,极细砂平均含量东岸＜西岸,沙尘平均粒径东岸＜西岸。沿黄河两岸沙丘与冰面沙尘的粒度参数峰度均为宽峰态,沙物质来源相似。

关键词: 黄河两岸;风沙流结构;粒度特征;黄河冰面;乌海市

乌海市地处干旱荒漠区,多风少雨,沿黄河两岸风沙活动强烈。沙尘入黄河主要发生在磴口－乌海段[1],黄河含沙量的逐年增加对下游水利工程构成严重威胁,造成乌海人民水资源利用的极大困扰[2]。虽然前人在风沙入黄量监测上取得了丰富的研究成果[3-7],但对入黄河、过黄河沙尘特征分析较少,黄河两岸沙丘风沙流差异研究尚不明确。因此,以黄河西岸沙丘－黄河冰面－黄河东岸沙丘为研究路径,对黄河两岸沙丘风沙流特征及沙尘粒度特征进行研究,将有助于解决沙尘输移与来源不明等问题,为乌海市黄河的沙尘防控提供理论指导。

风沙流结构既是防沙治沙的理论基础,也是风沙运动的核心问题之一[8]。风沙流结构是指气流搬运沙子在搬运层中随高度的分布[9]。影响风沙流结构的因素有很多,如风速、下垫面特性(土壤容重、地表紧实度、土壤含水量、植被盖度等)、沉积物等[10-11]。国内外学者从砂粒运动特征[12]、风沙流结构[13-14]、输沙率[15-20]、风沙流通量模型拟合[21]等方面对风沙流做了大量深入细致地研究,积累了丰富的资料,取得了较大进展[22]。借鉴前人对风沙流结构研究成熟的理论方法,通过对黄河两岸沙丘及黄河冰面风沙输移的观测,分析沿黄河两岸风沙流结构差异,利用冬季沙尘在黄河冰面上输移特点来分析入黄河沙尘特征,并解释黄河两岸风沙流结构差异的原因,为解决黄河沙尘防控问题提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古乌海市(图1),研究区分3个区域,以黄河为界,分为黄河西岸沙区(Ⅰ 区)和黄河东岸沙区(Ⅱ 区),冬季黄河冰面结冰,在黄河冰面(Ⅲ 区)做沙尘输移观测实验。Ⅰ 区与黄河沿岸相连,区域位置为39°39′14.31″～39°39′3.68″N,106°41′2.79″～106°42′8.67″E,沙尘防控技术主要是柠条与花棒带状混交,采用滴灌技术引黄灌溉。Ⅱ 区为黄河东岸沙区,西侧与乌兰布和沙漠、黄河、乌海市海勃湾区依次相连,东侧与乌海市摩尔沟煤矿相邻,区域位置为39°46′29.14″～39°46′13.39″N,106°49′56.26″～106°52′12.13″E,沙尘防控主要种植白刺防沙带。Ⅲ 区为冬季黄河冰面,两岸平均距离2.6 km,冬季冰面厚度能达到1 m以上,区域位置为39°32′51.73″～39°40′26.48″N,106°41′40.09″～

① 收稿日期:2019－07－23; 修订日期:2019－10－28
基金项目:国家重点研发计划“西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术”项目(2017YFC0504400);贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究项目(2018BFG02002)资助
作者简介:胡平(1993－),男,硕士研究生,研究方向为水土保持研究与荒漠化防治. E-mail:1509627872@qq.com
通讯作者:杨建英. E-mail:jyyang.yjy@qq.com

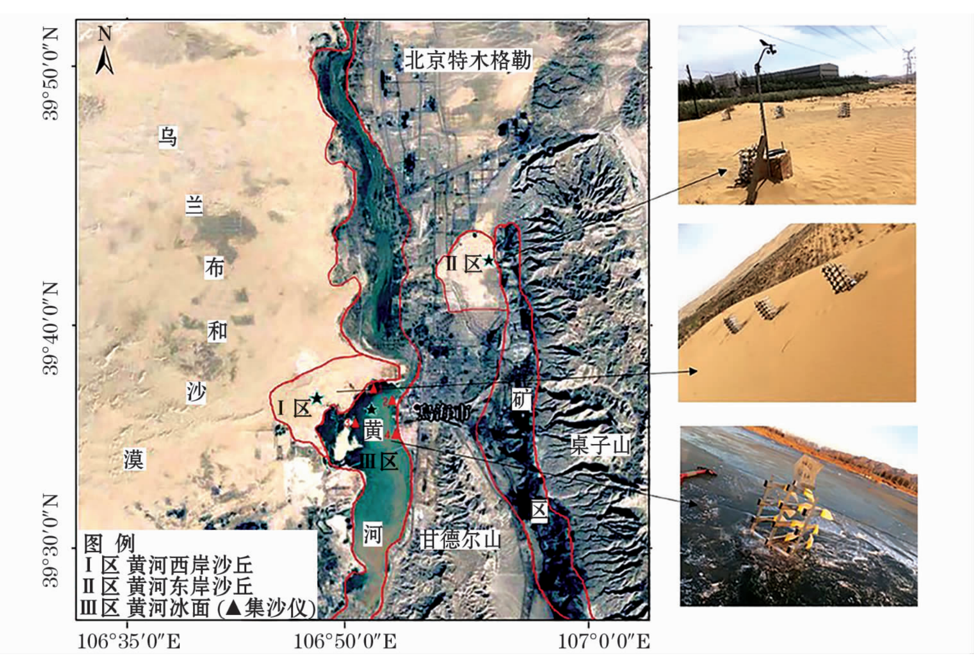


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch map of study area

106°47′03.84″E。研究区常年干旱，降水量极少，年平均风速 3.7 m·s^{-1}，大风天气扬尘以 3—5 月最多，年平均大风天数 10～32 d，多为西风和西南风[23]。研究区域耐旱植被基本相同，主要有佛子茅（*Calamagrostis epigeios*）、刺沙蓬（*Salsola ruthenica*）、四合木（*Tetraena mongolica*）、霸王（*Sarcozygium xanthoxylon*）、白刺（*Nitraria tangutorum*）、沙蒿（*Artemisia desertorum*）、沙米（*Agriophyllum squarrosum*）、猪毛菜（*Salsola collina*）等[24]。

1.2 研究方法

2018 年 3—5 月，沿黄河东西两岸沙丘选择扬沙天气观测 30 场起沙风实验，实验设计在平整的沙丘上布设 3 组组合式多通道通风集沙仪（专利号：ZL200620115806.6）（图 2），进沙孔宽 1.5 cm，孔高 3 cm，集沙仪高度为 16 个梯度，分别为 0～3，3～6，6～9，…，18～21，…，39～42，42～45，45～48 cm，将集沙仪依次整齐的排列固定在沙丘上且与沙面平齐。测不同起沙风场时调整进沙口风向与主风向垂直，主风向多为西风或西北风。每场风场实验集沙时间为 10 min，取 3 组集沙仪沙量的平均值你作为 1 次记录数据。同时，距集沙仪 2 m 处安置 1 台 Davis 气象站，测定离下垫面 2 m 高的风速，1 min 记录 1 次风速，取 10 min 内的风速平均值作为 1 次记录数据。最终剔除 6 组不完整实验数据，Ⅰ 区保留了 14 组有效数据，Ⅱ 区保留了 10 组有效数据，逐层总

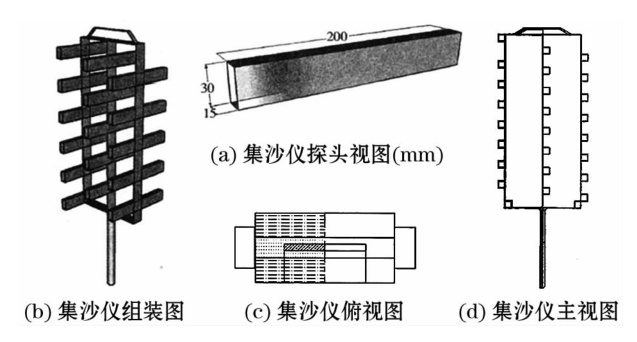


图 2 组合式多通道通风集沙仪

Fig. 2 Combined multi-channel ventilation sand collector

计收集风沙样品 1 150 个。2019 年 2—3 月，选择防洪堤段较为结实的冰面，在黄河上、下风向冰面各布设 2 台集沙仪，集沙仪布设与冰面平齐，集沙方向呈西北和正西方向交错，样品收集历时 1 个月，集沙仪布设如图 3 所示。同时收集 Ⅲ 区冰面滞尘砂粒，装入自封袋带回室内烘干、称重，采集样品总计 20 个。所收集样品用万分之一电子天平称量，LA－300 激光粒度仪进行沙尘粒径测定。Ⅰ 区、Ⅱ 区气候条件、植被类型等特征相似，对 2 个区域的研究结果进行可行性分析。

2 结果与分析

2.1 Ⅰ、Ⅱ 区总输沙率与风速关系

总输沙率是风沙流在不同垂直梯度上输沙率的总和，计算公式如（1）所示。由图 4 可知，Ⅰ 区各风

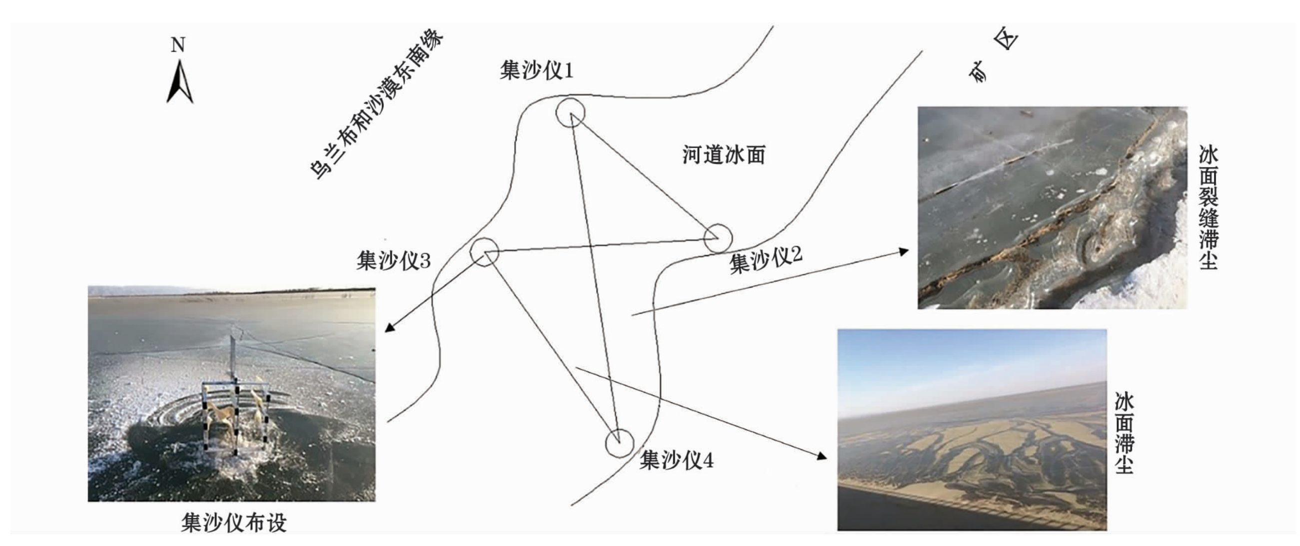


图3　冬季黄河冰面实验

Fig. 3　Ice surface experiment of the Yellow River in winter

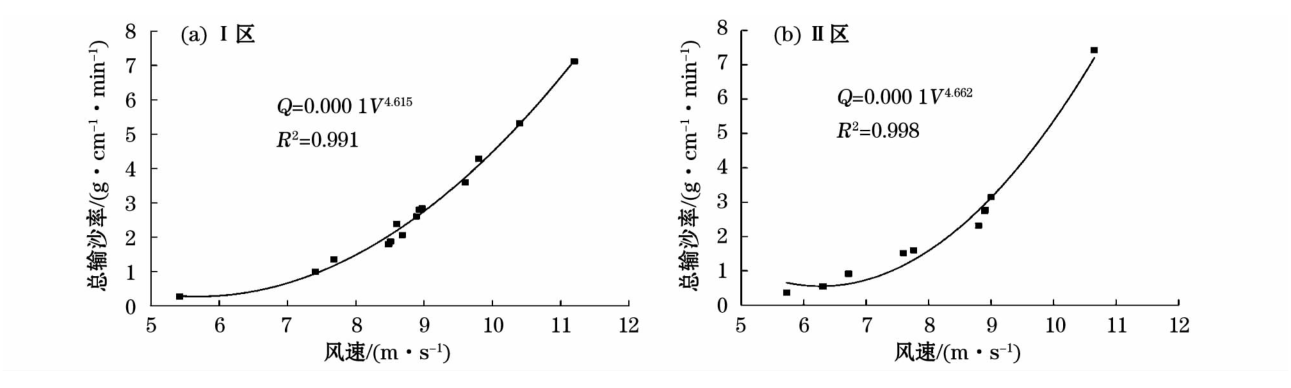


图4　Ⅰ、Ⅱ区总输率(Q)与风速(V)的关系

Fig. 4　Relation between total transport rate and wind speed in areas Ⅰ and Ⅱ

场实验平均风速在5.42~11.20 m·s^{-1},输沙率总计为39.297 g·cm^{-1}·min^{-1}。各场风总输沙率(Q)与2 m高风速(V)最优拟合呈幂函数递增关系,关系式为$Q=0.000\ 1V^{4.615}$($R^2=0.991$)。Ⅱ区各风场实验平均风速介于5.73~10.65 m·s^{-1},输沙率总计为46.634 g·cm^{-1}·min^{-1}。各场风总输沙率与2 m高风速最优拟合呈幂函数递增关系,关系式为$Q=0.000\ 1V^{4.662}$($R^2=0.988$)。随着风速的增加,沙尘的搬移高度也随之增大,输沙率也随之增大,这与前人的研究基本一致[25-29]。

$$Q_{0\sim48}=\sum_{k=0}^{n}Q_{k\sim k+3} \tag{1}$$

式中:n为从下到上高度层,$n=1,2,3,\cdots,16$;k为集沙仪进沙孔高度,$k=0,3,6,\cdots,45$。

2.2　风沙流结构特征

2.2.1　Ⅰ、Ⅱ区风沙流结构整体特征　由图5可知,Ⅰ、Ⅱ区各层总输沙率(Q)随高度(H)的增加呈幂函数递减关系。Ⅰ区各层总输沙率随高度的增加而减小,最优拟合关系式为$Q=40.871H^{-2.583}$($R^2=0.972$),下层(0~6 cm)输沙率为30.330 g·cm^{-1}·min^{-1},占总输沙率的60.19%,0~30 cm层

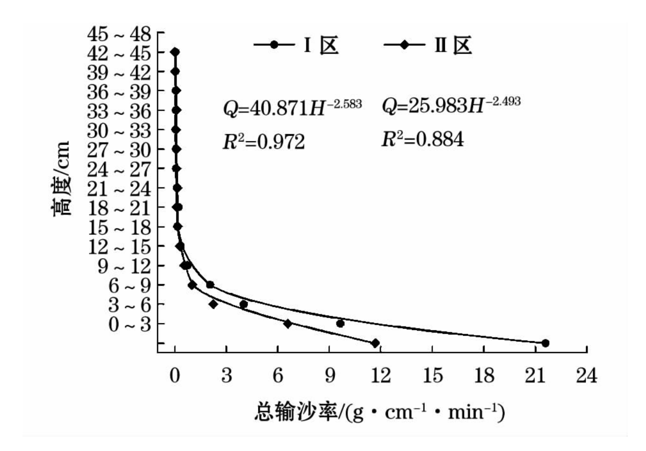


图5　Ⅰ、Ⅱ区风沙流结构整体特征

Fig. 5　Overall characteristics of the wind-sand flow structure in areas Ⅰ and Ⅱ

占总的95.59%；Ⅱ区各层总输沙率与高度最优拟合关系式为 $Q=25.983H^{-2.493}$，相关关系 $R^2=0.884$，0～6 cm输沙率为18.260 g·cm⁻¹·min⁻¹，占总输沙率的61.32%，0～30 cm层占总输沙率的98.36%。由此可知，Ⅰ区各层总输沙率与高度拟合优度较Ⅱ区好，Ⅰ、Ⅱ区0～30 cm层占总输沙率的95%以上。

2.2.2 Ⅰ、Ⅱ区不同风速下风沙流结构 由图6可知，一定风速下随着高度的增加，输沙率出现递减的趋势。随着风速的增大，输沙率也随之增大，输沙层越低输沙率变化幅度越明显。Ⅰ区各层输沙率介于0.001～3.292 g·cm⁻¹·min⁻¹，不同风速下输沙率随高度的增加均呈幂函数递减关系（表1），拟合相关系数较好（$R^2>0.85$）。当风速达到9.6 m·s⁻¹时，拟合方程 $Q=4.5917H^{-2.917}$，相关系数 $R^2=0.977$，拟合关系达到最好。Ⅱ区输沙率介于0～3.792 g·cm⁻¹·min⁻¹，不同风速下输沙率随高度的增加呈函数递减关系，当风速小于7.60 m·s⁻¹时，呈非幂函数递减关系，此时沙尘的输移高度集中在中底层（0～33 cm），上层（33～48 cm）无沙尘，随着风速的增大，拟合效果越好。当风速大于7.60 m·s⁻¹时，呈幂函数递增关系（$R^2>0.710$）。

2.3 砂粒粒径垂直分布特征

2.3.1 平均粒径垂直梯度变化 由图7可知，Ⅰ区砂粒平均值粒径整体大于Ⅱ区，各层砂粒平均粒径在0.1～0.25 mm，随高度的增大粒径随之减小，Arens等[30-31]的观测具有同样规律。Ⅱ区砂粒粒径大小随高度的增加递减幅度较快，Ⅰ区变化趋

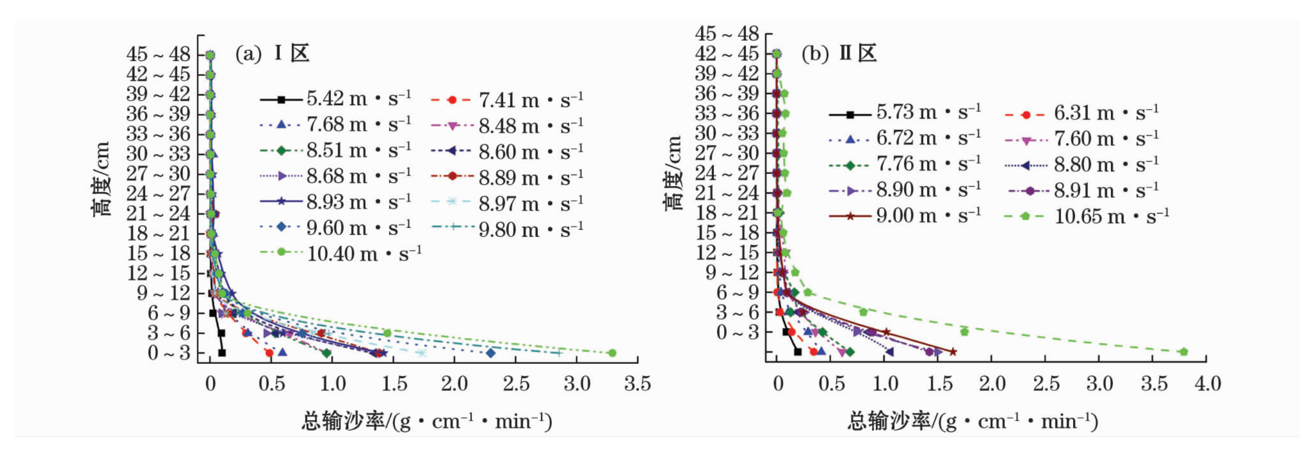


图6 Ⅰ、Ⅱ区不同风速下风沙流结构

Fig. 6 Wind-sand flow structure under different wind speeds in areas Ⅰ and Ⅱ

表1 一定风速下输沙率（Q）与高度（H）最优拟合关系式

Tab. 1 Optimal fitting relation between sand transport rate and height at a certain wind speed

Ⅰ区			Ⅱ区		
风速/(m·s⁻¹)	关系式	R^2	风速/(m·s⁻¹)	关系式	R^2
5.42	$Q=0.197H^{-1.987}$	0.855	5.73	$Q=-0.093\ln(H)+0.212$	0.656
7.68	$Q=0.941H^{-1.842}$	0.926	6.31	$Q=-0.056\ln(H)+0.130$	0.715
8.48	$Q=1.653H^{-2.847}$	0.930	6.72	$Q=-0.137\ln(H)+0.319$	0.784
8.51	$Q=3.632H^{-3.28}$	0.861	7.60	$Q=-0.199\ln(H)+0.477$	0.862
8.60	$Q=2.211H^{-2.364}$	0.976	7.76	$Q=1.294H^{-2.107}$	0.811
8.68	$Q=2.917H^{-3.314}$	0.912	8.80	$Q=5.180H^{-3.394}$	0.929
8.89	$Q=2.276H^{-2.719}$	0.872	8.90	$Q=4.179H^{-2.992}$	0.934
8.93	$Q=2.045H^{-2.018}$	0.953	8.91	$Q=5.155H^{-3.154}$	0.923
8.97	$Q=1.463H^{-2.345}$	0.876	9.00	$Q=5.859H^{-3.255}$	0.928
9.60	$Q=4.592H^{-2.917}$	0.977	10.65	$Q=6.289H^{-2.246}$	0.710
9.80	$Q=3.987H^{-2.856}$	0.915			
10.40	$Q=5.7693H^{-2.921}$	0.976			
11.20	$Q=11.178H^{-2.986}$	0.901			

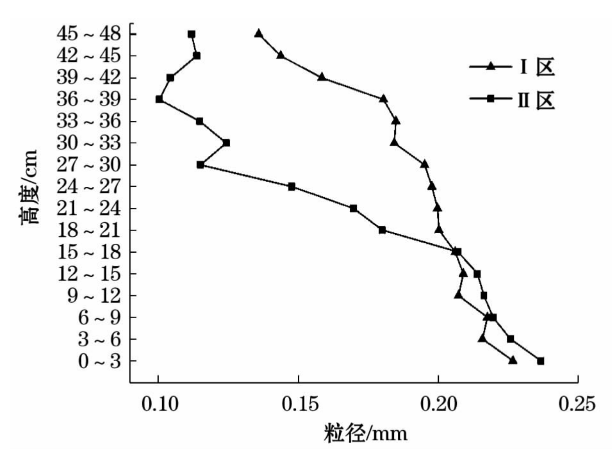


图 7　平均粒径随高度的变化关系

Fig. 7　Relationship between mean particle size and height

势较缓;Ⅱ 区沙丘在 0 ~ 18 cm 高度砂粒平均粒径大于 Ⅰ 区,中上层(18 ~48 cm)粒径均小于 Ⅰ 区,并且砂粒粒径大小差异较为明显。

2.3.2　不同粒级含量垂直变化特征　Ⅰ、Ⅱ 区砂粒主要由极细砂(0.05 ~0.1 mm)、细砂(0.1 ~0.25 mm)、中砂(0.25 ~0.5 mm)组成,因此对这 3 个粒级含量进行统计分析。图 8 是极细砂、细砂、中砂含量垂直变化关系。由图 8 可知,Ⅰ、Ⅱ 区沙丘细砂粒平均含量在 52% ~70%,是沙尘的主要组成部分,李清河等[32]对乌兰布和沙漠风沙运动的研究也有此规律。Ⅰ 区 0 ~48 cm 极细砂、细砂和中砂的平均含量分别为11.5%、62%和25.4%,细砂随着

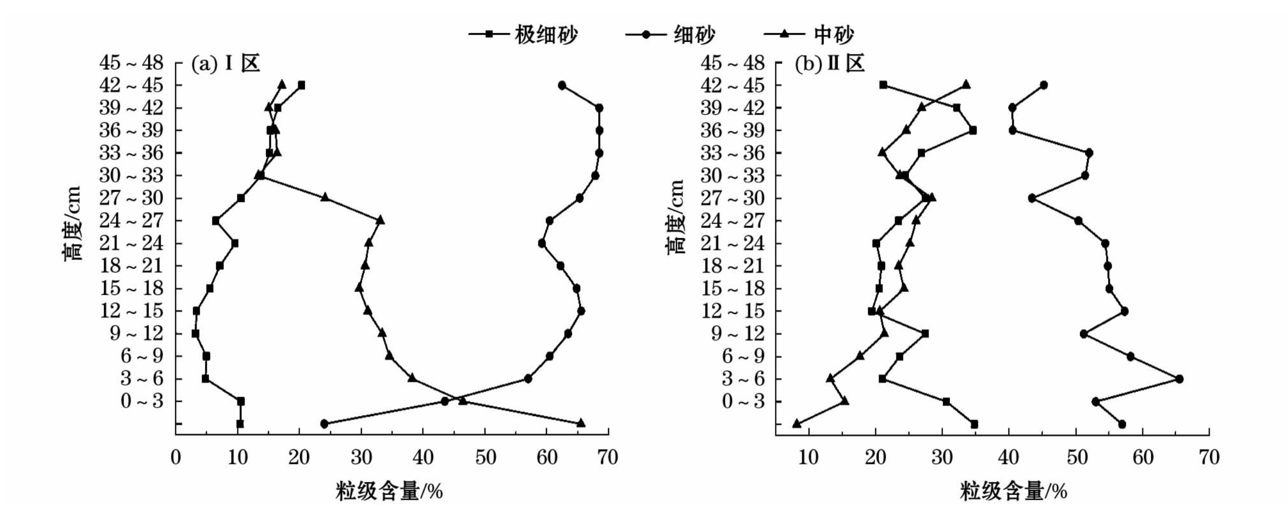


图 8　粒级含量随不同高度的变化关系

Fig. 8　Relationship between grain size content and different height

高度的增加先增加后保持稳定,极细砂粒随高度的增加呈递增趋势,中砂呈递减趋势,27 ~36 cm 高度层递减幅度明显;Ⅱ 区极细砂、细砂和中砂的平均含量分别为25%、52%和23.4%,中砂高度的增加呈递增趋势,细砂、极细砂随高度变化不明显,该研究与边凯等[33]对金字塔沙丘砂粒研究一致。经对比,极细砂平均含量 Ⅱ 区 > Ⅰ 区,细砂平均含量 Ⅰ 区 > Ⅱ 区,中砂平均含量 Ⅱ 区 < Ⅰ 区。

2.4　风沙流结构特征值

本研究风沙流均分布于0 ~30 cm,不同风速下在3 ~6 cm 的集沙量平均占比基本保持在20% ~23%之间,因此主要是0 ~3 cm 与6 ~30 cm 的风沙流含量发生变化。为了更好地表征蚀积状况,据吴正[34]风沙流结构特征值计算公式,风沙流特征值定义为 $\lambda = Q_{6\sim30}/Q_{0\sim3}$,$Q_{0\sim3}$是 0 ~ 3 cm 的输沙量,$Q_{6\sim30}$是6 ~30 cm 的输沙量。当 $\lambda > 1$ 时(非饱和风沙流),地表出现风蚀或搬运,不产生堆积,称非堆积搬运。当 $\lambda < 1$ 时(过饱和风沙流),地表产生堆积现象,当 $\lambda = 1$ 时(饱和风沙流),地表无风蚀、无堆积,称非蚀积搬运。

由表 2 可知,Ⅰ 区风沙流结构特征值 λ 随着风速的增加先减小后增大,当风速在 11.20 m · s^{-1}时,$\lambda > 1$,沙尘处于吹蚀搬运状态。当风速在5.42 ~10.4 m · s^{-1}时,$\lambda < 1$,$Q_{0\sim3} > Q_{6\sim30}$,风沙流处于饱和状态,表现为堆积。Ⅱ 区沙丘风沙流结构特征值随着风速的增大呈递增的趋势,这与杨欢等[35]对沙丘风沙流结构研究结果相符,当风速 <6.72 m · s^{-1},$\lambda < 1$,表现为堆积状态,风速在6.72 ~8.80 m · s^{-1}时,$\lambda > 1$,$Q_{0\sim3} < Q_{6\sim30}$,表现为吹蚀状态,随着风速的继续增大,风沙流结构特征值接近于1,近地面风沙流处于动态平衡状态。不难看出,达到搬运状态的风速 Ⅰ 区 > Ⅱ 区,矿采区风

表 2　不同风速下风沙流结构特征值 λ

Tab. 2　Characteristic values of wind-sand flow structure λ under different wind speeds

Ⅰ区		Ⅱ 区	
风速/(m·s^{-1})	特征值(λ)	风速/(m·s^{-1})	特征值(λ)
5.42	0.58	5.73	0.79
7.41	0.42	6.31	0.57
7.68	0.19	6.72	1.18
8.48	0.19	7.60	1.26
8.51	0.40	7.76	1.26
8.60	0.35	8.80	1.17
8.68	0.14	8.90	0.82
8.89	0.21	8.91	0.94
8.93	0.51	9.00	0.91
8.97	0.14	10.70	0.88
9.60	0.23		
9.80	0.45		
10.40	0.77		
11.20	1.12		

沙流更容易达到非饱和状态。

2.5　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区沙尘粒度参数特征

不同来源的颗粒粒径分布特征也存在差异，其粒度参数(平均粒径、分选系数、峰态与偏度)甚至粒径分布频率曲线也都有不同的表现形式[36]。为了分析 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区沙尘粒度特征，采用图解法[37]，分别对沙尘平均粒径 M_Z、分选系数 δ_φ、峰态 SK_φ 与偏度 K_φ 进行计算，求算公式如下：

$$M_Z = \frac{\varphi16 + \varphi50 + \varphi84}{3} \tag{1}$$

$$\delta_\varphi = \frac{\varphi84 - \varphi16}{4} + \frac{\varphi95 - \varphi5}{6.6} \tag{2}$$

$$SK_\varphi = \frac{\varphi16 + \varphi84 - 2\varphi50}{2(\varphi84 - \varphi16)} + \frac{\varphi5 + \varphi95 - 2\varphi50}{2(\varphi95 - \varphi5)} \tag{3}$$

$$K_\varphi = \frac{\varphi95 - \varphi5}{2.44(\varphi75 - \varphi25)} \tag{4}$$

式中：$\varphi5$、$\varphi16$、$\varphi25$、$\varphi50$、$\varphi75$、$\varphi84$、$\varphi95$ 分别表示沙尘粒度在分布累计曲线上 5%、16%、25%、50%、75%、84%、95% 对应的 φ 值。

由表 3 所知，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区平均粒径、分选系数、偏度、峰态值范围分别为 0.21 mm、0.16 mm、0.13 ~ 0.24 mm，1.71、1.65、1.01 ~ 1.52，0.13、0.11、-0.02 ~ 0.25，1.12、1.11、1.06 ~ 1.1。平均粒径在黄河西岸 - 黄河冰面 - 黄河东岸上依次递减，上风向集沙仪 1、3 沙尘粒径大于下风向集沙仪 2、4，黄河冰面滞尘颗粒物粒径偏大。黄河冰面沙尘分选系数差于沿黄河两岸沙丘沙尘，说明黄河冰面沙尘分选性较好；Ⅰ、Ⅱ 区偏度皆为正且相差不大，黄河冰面滞尘砂粒偏度为负，偏度为负，则沉积物偏向粗颗粒，即平均数将向中位数的较粗方向移动。峰度是度量粒度分布的中部和尾部展形之比，即表示粒度分布曲线凹凸程度的粒度参数，是解释物源成因的常用方法[37]，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区峰度都大于 0，为宽峰态，峰度参数相互间变化不明显，Ⅱ、Ⅲ 区沙物质来源与 Ⅰ 区相似。

表 3　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区沙尘粒度参数

Tab. 3　Particle size of sand parameter in the areas Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ

研究区域		平均粒径(M_Z)/mm	分选系数(δ_φ)	偏度(SK_φ)	峰度(K_φ)
Ⅰ 区		0.21	1.71	0.13	1.12
Ⅱ 区		0.16	1.65	0.11	1.11
Ⅲ 区	集沙仪 1	0.15	1.52	0.12	1.06
	集沙仪 2	0.14	1.06	0.21	1.15
	集沙仪 3	0.15	1.43	0.10	1.21
	集沙仪 4	0.13	1.01	0.25	1.07
	黄河冰面滞尘	0.24	1.35	-0.02	1.10

3　讨 论

为解释乌海市黄河两岸沙区风沙流结构、风沙流结构特征值、粒度存在较大差异的原因，对黄河冰面风沙流进行观测实验，为两岸风沙流结构差异的研究提供有效方法，同时为验证两岸沙区物质来源提供重要依据。

3.1　风沙流结构

风沙流结构是风沙研究的核心问题之一。Ⅰ、Ⅱ 区 0 ~ 30 cm 输沙率占总输沙率的 90% 以上，这与前人对风沙流含沙量主要集中在 0 ~ 30 cm 研究结果相符合[23,34,38-40]。但当风速较小时(5.73 ~ 7.60 m·s^{-1})，两岸沙丘风沙流结构差异较为明显，Ⅰ 区沙丘输沙率随高度呈幂函数关系，而 Ⅱ 区沙丘输沙率随高度呈非幂函数关系，Ⅱ 区 45 ~ 48 cm 高层基本未收到沙尘量，造成这一结果的主要原因是下垫面性质不同，不同下垫面差异对风速的削减不一样，从而影响了沙尘的搬移高度，由此造成了沙丘的风沙流结构差异，杨欢等[35]研究表明不同下垫面风沙流结构不一样，拟合函数也会存在差异，本文与其研究一致。

3.2　粒度与风沙流结构特征值

Ⅰ、Ⅱ 区风沙流极细砂粒、细砂粒含量分别为11.5%、62%和25%、52%,差异较为明显。Ⅰ区极细砂粒、细砂粒含量与前人研究较为符合,而 Ⅱ 区研究结果与前人研究差异较大[28,33,40]。出现这种结果的可能原因,Ⅱ 区沙丘周围存在大量的露天煤矿,张立志等[41]研究结果表明,煤矿浮尘粒径0.01~2 mm,中值粒径为0.098 mm,矿区浮尘的扩散影响沙丘表面沙尘平均粒度特征,致使细颗粒物质增加,因此,极细砂粒含量明显增大,细砂粒含量减小。在垂直梯度上,Ⅰ 区沙丘风沙流在0~18 cm高度砂粒的平均粒径小于 Ⅱ 区,中上层(18~48 cm)平均粒径均大于 Ⅱ 区,主要原因 Ⅰ 区沙丘荒漠植被覆被稀少,常年风蚀较为强烈,砂粒之间的碰撞导致粒度分选性较好,Ⅱ 区沙丘受到植被、排土场等影响,近地层风被拦挡,削弱了风的吹蚀。

Ⅰ、Ⅱ 区 λ 变化规律存在较大差异,Ⅰ 区沙丘 λ 随着风速的增大呈递增的趋势,当风速为11.20 m·s^{-1}时,λ>1,沙尘处于吹蚀搬运状态,即风沙流非饱和状态;Ⅱ 区沙丘 λ 随着风速的增加呈先增大后减小趋势,当风速大于6.72 m·s^{-1},λ>1,Ⅱ 区沙丘风沙流较 Ⅰ 区更容易达到非饱和状态。Ⅰ 区的研究结果与马世威[8]的研究结果一致,而 Ⅱ 区主要受下垫面性质的影响,植被与排土场等拦挡都会大大削弱风对砂粒的作用力,因此,当风速较小时风沙流基本达到非饱和状态。

3.3　Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区沙尘参数分析

根据黄河西岸-黄河冰面-黄河东岸风沙分析,大于0.19 mm的沙尘颗粒在黄河冰面蠕移过程中被冰面裂痕滞留,较细小颗粒随着冰面输移到黄河另一岸,致使黄河下风向沙尘粒径小于上风向沙尘粒径,由于 Ⅰ 区风沙中极细砂颗粒含量小于 Ⅱ 区,表明 Ⅱ 区沙丘沙物质来源可能与过黄河风沙有关。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 区峰度都大于0,且峰度参数相互间变化不明显,说明沙物质来源相似。

4　结 论

(1)黄河东西岸沙区各层总输沙率与高度拟合关系式分别为 $Q=40.871H^{-2.583}$($R^2=0.972$)、$Q=25.983H^{-2.493}$($R^2=0.884$),受下垫面差异影响,两岸沙丘不同风速的输沙率在垂直分布存在差异。

(2)冬季黄河冰面裂缝滞留沙尘粒径大于0.19 mm,砂粒较小颗粒则输移到东岸,东岸沙丘受矿采区粉尘扩散影响,极细砂粒含量增加,因此,黄河东岸沙丘沙尘平均粒径小于西岸。

(3)沿黄河两岸沙丘与黄河冰面沙尘的粒度参数的差异性较小,峰度均为宽峰态,说明,两岸沙丘沙尘与冰面输移沙尘来源相似,这对沿黄河两岸采取有效的风沙防护措施具有指示意义。

参考文献(References):

[1] 杨根生,拓万全. 风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J]. 西北水电,2004,62(3):44-49. [Yang Gensheng, Tuo Wanquan. The effect of wind-blown sand on sediment deposition in the channel for Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. Northwest Water Power,2004,62(3):44-49.]

[2] 何京丽,郭建英,邢恩德,等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. 农业工程学报,2012,28(17):71-77. [He Jingli, Guo Jianying, Xing Ende, et al. Structure of wind-sand flow and law of dune movement along bank of Yellow River in Ulan Buh desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(17):71-77.]

[3] 田世民,郭建英,尚红霞,等. 乌兰布和沙漠风沙入黄量研究[J]. 人民黄河,2017,39(7):65-70. [Tian Shimin, Guo Jianying, Shang Hongxia, et al. Aeolian sand into the Yellow River in Ulanbuh Desert area[J]. Yellow River,2017,39(7):65-70.]

[4] 杨根生,刘阳宣,史培军. 黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J]. 科学通报,1988,33(13):1017-1021. [Yang Gensheng, Liu Yangxuan, Shi Peijun. Estimates of aeolian sand encroach mentinto the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin,1998,33(13):1017-1021.]

[5] 张永亮. 从乌海风口入手加速乌兰布和沙漠治理步伐[J]. 林业经济,2008,30(12):38-40. [Zhang Yongliang. Accelerate the pace of Ulan Buh desert control from the draught of Wuhai[J]. Forestry Economics,2008,30(12):38-40.]

[6] 中国科学院兰州沙漠所黄土高原考察队. 黄河沙坡头—河曲河段风成沙入黄沙量的估算[J]. 人民黄河,1988,10(1):14-20. [Investigation Team of Lanzhou Desert Institute of Chinese Academy of Sciences on Loess Plateau. Estimation of aeolian sand into yellow sand in Shapotou-Hequ reach of the Yellow River[J]. Yellow River,1988,10(1):14-20.]

[7] 杨根生,拓万全,戴丰年,等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J]. 中国沙漠,2003,23(2):54-61. [Yang Gensheng, Tuo Wanquan, Dai Fengnian, et al. Contribution of sand sources to the silting of riverbed in Inner Mongolia section of Huanghe River[J]. Journal of Desert Research,2003,23(2):54-61.]

[8] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠,1988,8(3):8-22. [Ma Shiwei. Study on structure of wind-sand flow[J]. Journal of Desert Research,1988,8(3):8-22.]

[9] 丁国栋,奥村武信. 风沙流结构的风洞实验研究[J]. 内蒙古林学院学报,1994,16(1):40 - 46. [Ding Guodong,Takenobu Okumura. Experimental study on wind-sand flow in windtunnel[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College,1994,16(1):40 - 46.]

[10] 李钢铁,贾玉奎,王永生. 乌兰布和沙漠风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1):277 - 279. [Li Gangtie, Jia Yukui,Wang Yongsheng. Study on wind-sand flow structure in Ulan Buh desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2004,18(1):277 - 279.]

[11] 张华,李锋瑞,张铜会,等. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征[J]. 水土保持学报,2002,16(2):20 - 28. [Zhang Hua,Li Fengrui,Zhang Tonghui,et al. Wind sand flow structure and its variation under different surface conditions in Korqin Sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2002,16(2):20 - 28.]

[12] Chepil W S. Dynamics of wind erosion[J]. Soil Science,1945,60(2):97 - 411.

[13] 兹纳门斯基著. A. И,杨郁华. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题[M]. 北京:科学出版社,1960:65 - 70. [Znamensk. A. И, Yang Yuhua. Experimental Study on Sand Erosion Process and Sand Pile Prevention[M]. Beijing:Science Press, 1960:65 - 70.]

[14] 朱震达,吴正,刘恕. 中国沙漠概论[M]. 北京:科学出版社,1980:93 - 105. [Zhu Zhenda,Wu Zheng,Liu Shu. An Introduction to Deserts in China[M]. Beijing:Science Press,1980:93 - 105.]

[15] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes methuen[J]. Nature,1941,18(4):167 - 187.

[16] 俎瑞平,张克存,屈建军,等. 塔克拉玛干沙漠风况特征研究[J]. 干旱区地理,2005,28(2):167 - 170. [Zu Ruiping,Zhang Kecun,Qu Jianjun,et al. Study on wind regime characteristics in the Taklimakan Desert[J]. Arid Land Geography,2005,28(2):167 - 170.]

[17] 韩致文,董治宝,王涛,等. 塔克拉玛干沙漠风沙运动若干特征观测研究[J]. 地球科学,2003,33(3):255 - 263. [Han Zhiwen,Dong Zhibao,Wang Tao,et al. Observation and study on some characteristics of wind-sand movement in Taklimakan desert[J]. Earth Science,2003,33(3):255 - 263.]

[18] 周丹丹,董建林,高永,等. 巴音温都尔沙漠表层土壤粒度特征及风蚀量估算[J]. 干旱区地理,2008,31(6):934 - 939. [Zhou Dandan,Dong Jianlin,Gao Yong,et al. Grain sizes analysis and soil loss of surface soil during desertification process on Bayinwenduer Desert[J]. Arid Land Geography,2008,31(6):934 - 939.]

[19] Bauer B O,Houser C A,Nickling W G. Analysis of velocity profile measurements from wind-tunnel experiments with saltation[J]. Geomorphology,2004,59(1):81 - 98.

[20] Zobeck T M,Pelt RSV. Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field[J]. Journal of Hazardous Materials,2006,132(1):26 - 38.

[21] Ellis J T,Li B,Farrell E J,et al. Protocols for characterizing aeolian mass-flux profiles[J]. Aeolian Research,2009,1(1):19 - 26.

[22] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1200 - 1207. [Liu Fang, Hao Yuguang,Xin Zhiming,et al. The surface aeolian-sand flow structure in the Northeastern Margin of the Ulanbuh Desert[J]. Journal of Desert Research,2014,34(5):1200 - 1207.]

[23] 李锦荣,郭建英,董智,等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同治理措施的风沙运移特征及其防护效果[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8):113 - 119. [Li Jinrong,Guo Jianying,Dong Zhi,et al. Sand moving characteristics and the protective effect of governance measures along bank of Yellow River in Ulan Buh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment,2016,30(8):113 - 119.]

[24] 高永,党晓宏,虞毅,等. 乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿(*Artemisia sphaerocphala*)灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J]. 中国沙漠,2015,35(1):1 - 7. [Gao Yong,Dang Xiaohong,Yu Yi,et al. Nabkha morphological characteristics and sand fixing capacity of *Artemisia sphaerocphala*in the Southeastern edge of the Ulan Buh Desert[J]. Journal of Desert Research,2015,35(1):1 - 7.]

[25] 韩致文. 半湿润地区风沙流结构的定量研究——以豫北沙地为例[J]. 中国沙漠,1993,13(3):25 - 32. [Han Zhiwen. Quanititve study on wind sand flow strueture in semihumid zone:Taking sandy land in Northern Henan as an Example[J]. Journal of Desert Research,1993,13(3):25 - 32.]

[26] 董玉祥,马骏. 风速对海岸沙丘表面风沙流结构影响的实证研究[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(9):179 - 183. [Dong Yuxiang,Ma Jun. Field measurements of influence of total sand transport rate on the structure of wind-sand flow on the coastal transverse ridge[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2009,23(9):179 - 183.]

[27] 徐军,章尧想,郝玉光,等. 乌兰布和沙漠流动沙丘风沙流结构的定量研究[J]. 中国农学通报,2013,29(19):62 - 66. [Xu Jun,Zhang Yaoxiang,He Yuguang,et al. The quantitative study of wind-sand flow structure in the mobile sand dune of Ulanbuh Desert[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(19):62 - 66.]

[28] 包岩峰,丁国栋,吴斌,等. 毛乌素沙地风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(2):118 - 123. [Bao Yanfeng, Ding Guodong,Wu Bin,et al. Study on the wind-sand flow structure in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment,2013,27(2):118 - 123.]

[29] 王翔宇,朴东均,丁国栋,等. 流动沙丘风沙流结构的定量研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):36 - 39. [Wang Xiangyu,Piao Dongjun,Ding Guodong,et al. Study of the wind-sand flow structure on flowing sand[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(2):36 - 39.]

[30] Arens S M,Boxel JHV,Abuodha JOZ. Changes in grain size of sand in transport over a foredune[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2002,27(11):1163 - 1175.

[31] Chen Weinan,Yang Zuotao,Dong Zhibao. Vertical distribution of grain size parameters during sand storms in the Taklamakan Desert Central Asia[J]. Physical Geography,1995,16(6):503 - 523.

[32] 李清河,包耀贤,王志刚. 乌兰布和沙漠风沙运动规律研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):86 - 89. [Li Qinghe,Bao Yaoxian,Wang Zhigang,et al. Study on aeolian sand movement law in Ulanbuhe Desert[J]. Journal of Soil Water Conservation,2003,17(4):86 - 89.]

[33] 边凯,张伟民,谭立海,等. 偏西风作用下敦煌月牙泉金字塔沙山顶部风沙流初步观测研究[J]. 中国沙漠,2016,35(6):1503 - 1511. [Biao Kai,Zhang Weimin,Tan Lihai,et al. Aeolian sediment slux and grain size over the top area of a star dune near the crescent moon spring of Dunhuang under westerly winds[J]. Journal of Desert Research,2016,35(6):1503 - 1511.]

[34] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003. [Wu Zheng. Aeolian Sand Geomorphology and Sand Control Engineering[M]. Beijing:Science Press,2003.]

[35 杨欢,李玉强,王旭洋,等. 半干旱区不同类型沙丘风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2018,38(6):30 - 38. [Yang Huan,Li Yuqiang,Wang Xuyang,et al. Characteristics of aeolian sediment flux structure over different underlying surfaces in semi-arid area[J]. Journal of Desert Research,2018,38(6):30 - 38.]

[36] 刘佳. 兰州市大气降尘粒度分布特征与来源研究[D]. 兰州:兰州大学,2012. [Liu Jia. Study on the Source and Characteristics of Grain Size Distribution of Atmospheric Dust Fall in Lanzhou[D]. Lanzhou:Journal of Lanzhou University,2012.]

[37] 桂洪杰. 黄河宁蒙河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D]. 兰州:兰州大学,2013. [Gui Hongjie. Comparative Studies on Characteristics of Grain Sizes and Elements of the Four Deserts in Ningxia-Inner Mongolia Section of the Yellow River[D]. Lanzhou:Journal of Lanzhou University,2013.]

[38] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2010. [Ding Guodong. Aeolian Sand Physics[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2010.]

[39] 刘芳,郝玉光,徐军,等. 乌兰布和沙区风沙运移特征分析[J]. 干旱区地理,2014,37(6):1163 - 1169. [Liu Fang,Hao Yuguang,Xu Jun,et al. Sand flow characteristics in Ulan Buh Desert[J]. Arid Land Geography,2014,37(6):1163 - 1169.]

[40] 张惜伟,汪季,海春兴. 呼伦贝尔沙质草原风蚀坑地表风沙流结构特征[J]. 干旱区研究,2018,34(6):1505 - 1511. [Zhang Xiwei,Wang Ji,Hai Chunxing. Structure of drifting sand flow over the surface of blowouts in the Hulun Buir sandy grasslands[J]. Arid Zone Research,2018,34(6):1505 - 1511.]

[41] 张立志,王潇,张召强. 综采工作面煤尘粒度分布特性分析[J]. 煤矿现代化,2017,23(2):138 - 140. [Zhang Lizhi,Wang Xiao,Zhang Zhaoqiang. Analysis of particle size distribution of coal dust in fully mechanized face[J]. Coal Mine Modernization,2017,23(2):138 - 140.]

Structure difference of wind sand flow and characteristics of wind sand on the ice surface of sand dunes on both sides of the Yellow River in Wuhai City

HU Ping, YANG Jian-ying, ZHANG Yan, WU Hong-xuan, LIU Yun, SHI Chang-qing

(*School of Soil and Water Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083)

Abstract: To study the difference of sand dune wind-sand flow structure along the Yellow River and characteristics of wind sand on the ice surface in Wuhai City wind-sand observation experiments were conducted on the west bank of the Yellow River, the Yellow River ice surface, and the east bank of the Yellow River, and contrast analysis of sand-sand flow structure and sand particle size characteristics was conducted on the banks of the Yellow River to provide a theoretical basis for solving the dust control of the Yellow River. The results indicated that the total sediment transport rate of sand dunes on both banks of the Yellow River decreased with height, although the goodness-of-fit of the east bank sediment transport rate and height were worse than the west bank, as it is easier to reach the unsaturated state on the east bank of the sand flow than the west bank. The grain size of the sand retained in the cracks on the ice surface of the Yellow River was larger than 0.19 mm, and smaller particles were transported to the east bank. The content of the very fine sand, which was 0.05 - 0.1 mm, in the sand dunes on the east bank was affected by the dust in the mining area, the average content of the very fine sand in the east bank was less than that of the west bank, and the average particle size of the sand on the east bank was smaller than that on the west bank. The parameters of particles along the banks of the Yellow River and the surface of the ice showed broad peaks, and the source of the sand was found to be similar.

Key words: Yellow River; wind-sand flow structure; particle characteristics; ice surface; Wuhai City